

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放测量 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 ..... 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 ..... 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 ..... 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 ..... 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 ..... 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 ..... 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 ..... 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 ..... 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 ..... 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 ..... 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 ..... 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 ..... 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 ..... 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 ..... 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 ..... 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 ..... 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 ..... 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 ..... 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 ..... 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) ..... 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 ..... 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 ..... 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 ..... 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 ..... 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 ..... 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 ..... 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 ..... 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 ..... 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 ..... 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 ..... 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 ..... 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 ..... 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 ..... 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 ..... 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 ..... 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 ..... 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 ..... 龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 ..... 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 ..... 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 ..... 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 ..... 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 ..... 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 ..... 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 ..... 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 复合物的制备及可见光催化降解 MO ..... 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 ..... 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

# 维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化

徐宇<sup>1,2</sup>, 肖化云<sup>1\*</sup>, 郑能建<sup>1,2</sup>, 张忠义<sup>1,2</sup>, 瞿玲露<sup>1,2</sup>, 赵晶晶<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 同时测定了从贵阳市区到农村 3 个方向采集的樟树叶、马尾松叶、根际土以及苔藓共计 296 个样品的氮、硫含量, 结合苔藓氮、硫含量估算了相应区域大气氮沉降量和 SO<sub>2</sub> 浓度. 结果表明樟树叶氮含量 (1.01% ~ 2.37%) 和马尾松叶氮含量 (0.99% ~ 2.42%) 在市区最高, 往外明显降低, 而在较远农村区域 (> 24 km) 又出现回升, 反映了农村地区大气输入的氮有所增加; 叶硫含量变化范围分别为 0.16% ~ 0.43% 和 0.18% ~ 0.32%, 均呈现在市区最高, 向外逐渐降低的趋势, 在距市区最远处 (30 ~ 36 km) 达到最低值, 表明市区的生产生活向大气输入了较高的硫. 各区域土壤氮、硫含量均无显著差异, 将樟树、松树叶氮、硫含量分别与大气氮沉降量和 SO<sub>2</sub> 浓度 (由苔藓氮、硫值计算) 进行线性回归分析, 发现樟树、松树叶氮含量与大气氮沉降量以及樟树、松树叶硫含量与大气 SO<sub>2</sub> 浓度均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ). 研究表明维管束植物樟树与马尾松叶组织氮、硫含量的变化特征能同时很好地指示贵阳区域大气氮、硫沉降的空间变化.

**关键词:** 樟树; 马尾松; 石生苔藓; 大气氮沉降; 大气硫沉降; 二氧化硫

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2376-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.06.048

## N% and S% in Leaves of Vascular Plants *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition

XU Yu<sup>1,2</sup>, XIAO Hua-yun<sup>1\*</sup>, ZHENG Neng-jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhong-yi<sup>1,2</sup>, QU Ling-lu<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing-jing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** N and S contents in *Cinnamomum camphora* leaves, *Pinus massoniana* Lamb. leaves, epilithic *Haplocladium microphyllum* (Hedw.) Broth. and rhizosphere soil collected along 3 directions from urban area to rural area at Guiyang city in a total of 296 samples were investigated systematically. The level of atmospheric N deposition and atmospheric SO<sub>2</sub> concentrations at each sampling site were calculated according to the quantitative relationship between moss N content and atmospheric N deposition and the quantitative relationship between moss S content and atmospheric SO<sub>2</sub> concentration. Leaves N content in *Cinnamomum camphora* (1.01% - 2.37%) and *Pinus massoniana* Lamb. (0.99% - 2.42%) showed significant decrease from urban area with the highest atmospheric nitrogen deposition to suburb, while slightly higher leaves N reemerged at rural area beyond 24 km, suggesting increased N deposition occurred in rural area. Leaves S content in *Cinnamomum camphora* (0.16% - 0.43%) and *Pinus massoniana* Lamb. (0.18% - 0.32%) showed significant decrease from urban area to suburb, the highest level at urban was mainly contributed by the high sulfur released from the production and living of urban areas into the atmosphere, and the lowest level occurred at rural area (30 - 36 km). No significant difference was seen for soil N and S contents. The relationships between the estimated input of atmospheric N deposition and the leaves N content of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* Lamb. at the sites investigated were found to be significant linear correlations, and the relationships between the estimated atmospheric SO<sub>2</sub> concentration and the leaves S content of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* Lamb. were also significant linear correlations ( $P < 0.05$ ). The results indicated that N and S contents in *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* Lamb. leaves can be used to show the spatial variation of atmospheric N and S deposition.

**Key words:** *Cinnamomum camphora*; *Pinus massoniana* Lamb.; epilithic moss; atmospheric N deposition; atmospheric S deposition; sulfur dioxide

经济快速发展的同时, 因化石燃料大量使用而造成的高大气氮、硫沉降让生态环境面临着巨大的压力<sup>[1]</sup>. 大气氮沉降的增加破坏了生态系统的结构和功能, 使得植物对环境胁迫的抵御能力降低<sup>[2]</sup>, 增加的硫沉降更会加速植物生理功能发生改变, 而

收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2015-12-30

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2013CB956703); 国家自然科学基金项目 (41425014, 41173027)

作者简介: 徐宇 (1990 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: dhsxuyu@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: xiaohuayun@vip.skleg.cn

SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 协同作用下对树木的伤害, 比 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 单独作用时更大<sup>[3]</sup>, 如同时存在较高浓度的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 时会加速作物产量的下降<sup>[4]</sup>, 大气中增加的氮氧化物(NO<sub>x</sub>) 和硫氧化物(SO<sub>x</sub>) 甚至能增加人体花粉过敏的几率<sup>[5]</sup>. 城市是经济生产和能源消耗的核心地区, 城市及其周边区域的生态环境比自然生态系统更为脆弱敏感, 高大气氮、硫沉降的影响可能更为严重, 因此, 同时监测城市地区大气氮、硫的沉降水平和变化对城市大气氮、硫污染的防治和深入理解大气氮、硫沉降的生态环境效应具有重要意义.

苔藓植物由于其特殊的形态结构和生物学特性而被广泛应用于大气环境的指示以及大气沉降物质输入的研究<sup>[6]</sup>. 但由于苔藓植物特殊的生境, 使得在特定地区选取该类植物指示大气氮、硫沉降时有所限制. 高等植物叶片能直接吸收大气中的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub><sup>[7]</sup>, 并将它们转化成相应的硫酸盐和硝酸盐, 再经还原过程最后参与氨基酸和蛋白质的合成<sup>[8]</sup>. 研究认为, 即使在植物生长期叶氮含量增加有所限制的情况下, 高等植物叶化学组成, 尤其是氮含量的变化仍能很好地指示大气氮沉降的变化<sup>[9]</sup>, 近年来, 用高等植物叶片, 尤其是松叶硫含量指示大气硫沉降的研究也日益增多<sup>[10, 11]</sup>, 而且, 更为重要的是, 植物叶片中硫的积累与氮的供应密切相关, 高氮、硫沉降下植物叶片对氮和硫的积累机制会发生变化<sup>[7, 12, 13]</sup>, 这便需要探究植物叶片同时对大气氮、硫沉降的响应情况.

酸雨的主要成分就是来自大气中的氮氧化物和硫氧化物, 但过去主要是分别针对大气氮氧化物和硫氧化物的来源和沉降量进行研究, 缺乏对大气氮、硫沉降的同步研究且前人较多使用苔藓或松科植物作为生物指示物来探究苔藓组织和针叶对氮或硫的响应情况<sup>[14, 15]</sup>, 本文以有过酸雨污染历史的贵阳市为例, 选取城市中存在较多的维管束植物樟树(阔叶)和马尾松为研究对象, 对其叶氮、硫含量进行分析, 同时测定对应区域的苔藓氮、硫含量作为参考, 进而了解维管束植物樟树和马尾松叶总氮、硫含量与大气氮、硫沉降的关系, 主要目的在于反映贵阳市大气的氮、硫沉降量和空间变化, 揭示维管束植物叶片氮、硫含量能同时指示大气氮、硫沉降的可靠性, 以期为进一步开展应用植物组织监测大气氮、硫沉降和研究大气氮、硫沉降的生态环境效应提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究区域为贵阳, 地处我国生态环境较脆弱的西南喀斯特地区, 地势南北高、中部低, 平均海拔 1 250 m, 纬度低, 具有明显的高原性季风气候, 系亚热带湿润温和型气候的特点, 市区位于苗岭北坡的一个山间小盆地内, 四周群山环抱, 市区全年以静风为主, 平均风速较小. 贵阳市以樟树作为主要的绿化植物, 松树在市区和郊区分布广泛.

### 1.2 样品采集和处理

选取的植物种类为樟树(*Cinnamomum camphora*) 和马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.), 苔藓为细叶小羽藓 [*Haplocladium microphyllum* (Hedw.) Broth.]. 为了减少樟树或者松树种内的差异和因根在土壤中生长深度的不同而造成营养吸收上的巨大差别, 樟树选取长势相同、树龄相近且生长都超过 8 a, 树高约为 5 m 的进行采样, 松树选取长势相同、树龄相近且生长都超过 8 a, 树高约为 10 m 的进行采样. 所有树叶都是当年生的成熟叶. 对于苔藓, 所有样品均生于没有薄土的岩石表面, 避免与其他草本植物混生且不受树冠和建筑物的遮挡, 同时充分考虑不受地表水冲刷和其他局部污染源(如农村粪堆、城市宠物排泄、踩踏等)的影响, 市区采样点集中在城市山体附近, 离开市区后所选采样点避免了主要公路的影响. 采样时间为 2015 年 5 月 10 日至 2015 年 6 月 31 日, 共采集樟叶样品 103 个, 针叶样品 92 个, 苔藓样品 26 个, 根际土壤样品 75 个, 图 1 为采样点分布情况. 采集的样品放入自封袋带回实验室. 用超纯水(Milli-Q)反复冲洗以彻底去除表面吸附的尘土和颗粒物, 再用冻干机冻 72 h, 然后用粉碎机粉碎, 过 100 目筛. 土壤样品自然风干后, 用研钵粉碎, 过 100 目筛.

### 1.3 浓度测定

所有样品重新干燥后称取 20 ~ 40 mg, 用 Elementar 公司的 Vario MACRO cube 元素分析仪(German)测定其氮、硫含量(质量分数, 以干质量计), 其测量精度优于 0.1%. 所有实验和分析在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品总氮含量的变化特征和指示意义

图 2 显示了贵阳地区从市中心往外每 6 km 范

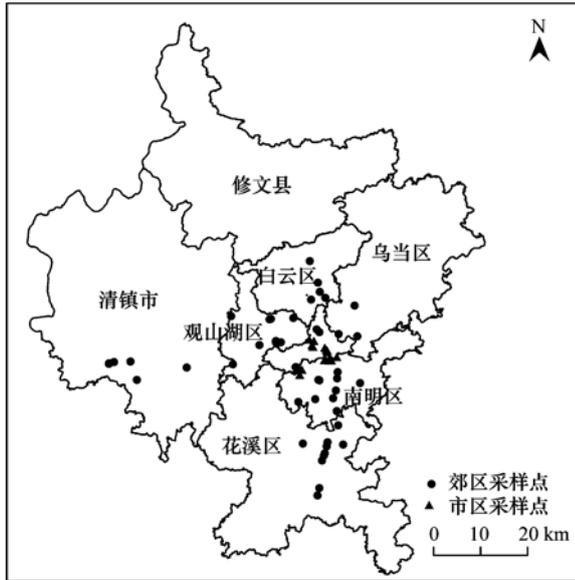


图1 贵阳地区采样点分布示意

Fig. 1 Map showing sampling locations in Guiyang area

围内樟树和松树氮含量的空间变化特征. 各区域樟叶和松叶总氮含量的变化范围分别为 1.01% ~ 2.37% 和 0.99% ~ 2.42%, 贵阳区域樟树叶氮含量最高值(2.37%)出现在市区 0~6 km 范围, 该值低于南昌市 [大气氮沉降水平大于 40 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>]<sup>[16]</sup> 测得的平均樟树叶氮含量 (3.09%)<sup>[17]</sup>, 而均值(1.77%) 高于美国 California 州 Modesto、Stockton 以及 Lodi 地区的樟树叶氮含量均值 1.56% (1.17% ~ 1.96%)<sup>[18]</sup>. 松叶氮含量在 18~24 km 范围内最低 [用苔藓氮含量估算的该区域大气氮沉降量为 11.68 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>], 均值为 1.19%, 该值与大气氮沉降水平为 13 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 的瑞典 Gardsjon 地区针叶氮含量 (1.3%) 相当, 而氮沉降相对最高的市区针叶氮含量均值也相对最高 (1.68%), 但该值低于大气氮沉降水平为 59 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 的荷兰 Ysselsteyn 地区针叶氮含量 (2.6%)<sup>[19]</sup>. 因此, 该研究区域不同地点的维管束植物樟树和马尾松叶总氮含量差异可以反映大气氮沉降的差异.

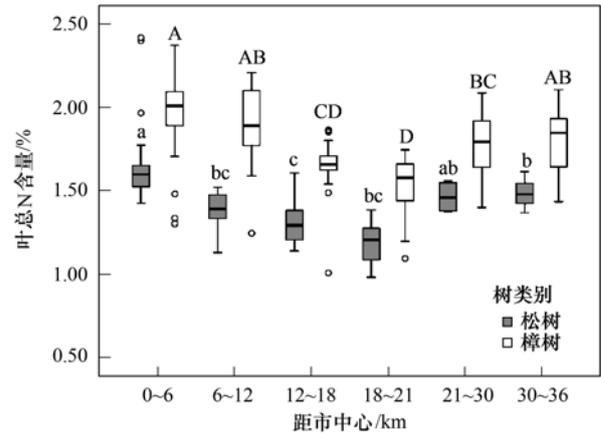


图2 贵阳地区从市中心往外樟树和松树叶氮含量空间变化

Fig. 2 Spatial variations of N content in *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* Lamb. leaves with the distance from the Guiyang center

贵阳市区 0~6 km 范围内樟树和松树平均氮含量均为最高 (分别为 1.95% 和 1.68%), 叶氮含量均从市区往外逐渐降低, 最低值均出现在离市中心 18~24 km (该区域人为活动干扰小) 的范围, 随着距离的延伸, 樟树和松树叶氮含量都出现回升, 但均值都低于市区, 这可能反映了城市的生产生活带来了相对较高的大气氮沉降, 但市区的主要氮污染物大部分在 20 km 以内沉降, 只有少量继续向外扩散或迁移<sup>[20]</sup>, 而在较远的农村地区, 农业活动增强, 农业氨释放增加, 导致当地大气氮沉降略微升高, 该结果与城市市区大气氮沉降高、郊区低的普遍情况一致<sup>[21, 22]</sup>. 又由于在土壤氮含量无明显差异的情况下 (表 1), 非污染区域 (18~24 km) 樟树和松树叶氮含量相对最低 (对应的叶片氮含量也均相对最低), 而该区域松针氮含量均值为 1.19%, 该值仍高于土壤氮含量为 0.59% 的美国 Harvard 森林 (非污染区) 松针叶氮含量 (1.00%)<sup>[23]</sup>, 更高于背景区南昆山马尾松叶氮含量 (0.1% ~ 0.2%)<sup>[24]</sup>, 这些说明了贵阳地区已经普遍受到人为活动带来的大气氮

表 1 不同采样点植物和土壤的氮、硫含量<sup>1)</sup>

Table 1 N and S contents of leaves from different sampling sites

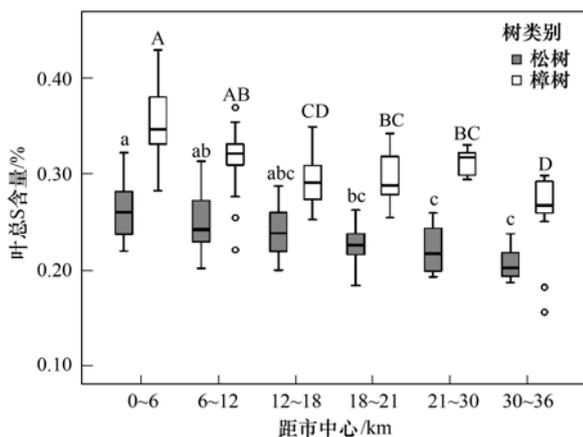
距离/km	样品数 (n)		氮含量 (DW)/%				硫含量 (DW)/%			
	樟树	松树	樟树	樟树根际土	松树	松树根际土	樟树	樟树根际土	松树	松树根际土
0~6	22	20	1.95 ± 0.27	0.24 ± 0.07 (a)	1.68 ± 0.27	0.22 ± 0.07 (a)	0.35 ± 0.03	0.06 ± 0.01 (b)	0.26 ± 0.03	0.04 ± 0.02 (b)
6~12	20	15	1.89 ± 0.23	0.20 ± 0.09 (a)	1.39 ± 0.11	0.20 ± 0.05 (a)	0.33 ± 0.09	0.05 ± 0.03 (b)	0.25 ± 0.03	0.04 ± 0.01 (b)
12~18	23	20	1.65 ± 0.17	0.15 ± 0.07 (a)	1.32 ± 0.12	0.29 ± 0.15 (a)	0.29 ± 0.02	0.05 ± 0.01 (b)	0.23 ± 0.02	0.06 ± 0.03 (b)
18~24	13	19	1.53 ± 0.20	0.15 ± 0.07 (a)	1.19 ± 0.13	0.18 ± 0.05 (a)	0.30 ± 0.03	0.06 ± 0.04 (b)	0.22 ± 0.02	0.06 ± 0.05 (b)
24~30	12	6	1.76 ± 0.20	0.19 ± 0.04 (a)	1.46 ± 0.07	0.25 ± 0.07 (a)	0.31 ± 0.01	0.06 ± 0.01 (b)	0.22 ± 0.02	0.04 ± 0.02 (b)
30~36	13	12	1.82 ± 0.20	0.23 ± 0.04 (a)	1.49 ± 0.07	0.22 ± 0.05 (a)	0.26 ± 0.04	0.06 ± 0.02 (b)	0.21 ± 0.02	0.06 ± 0.04 (b)

1) 有相同字母的值之间没有显著性差异 (P < 0.05)

输入的影响。

## 2.2 样品总硫含量的变化特征和指示意义

大气硫沉降能直接影响植物组织的硫含量,在高大硫沉降量的地区维管束植物叶组织也有着高的硫含量,有研究发现松科植物长期暴露于高  $\text{SO}_2$  环境中,趋向于增加针叶中总硫的含量<sup>[11, 25]</sup>。图 3 显示了贵阳地区从市中心往外每 6 km 范围内樟树和松树硫含量的空间变化特征,各区域樟叶和松叶总硫含量的变化范围分别为 0.16% ~ 0.43% 和 0.18% ~ 0.32%, 均值分别为 0.31% 和 0.23%。市区樟树叶硫含量均值相对最高(0.35%), 该值远高于污染较严重的上海市区(年均  $\text{SO}_2$  浓度为  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )樟树叶硫含量(0.17%)<sup>[26]</sup>, 在 30 ~ 36 km 范围内松树叶硫含量均值最低(0.21%), 但该值仍高于作为背景区的南昆山(距广州市区 90 km)马尾松叶硫含量(0.17%)<sup>[27]</sup>, 说明贵阳市受到了较高硫沉降的影响。从图 3 中可以看出樟树和松树叶硫含量从市区向外均呈现逐渐降低的趋势, 在离市区最远的 30 ~ 36 km 范围内樟树和松树叶硫含量均值都达到最低值, 分别为 0.26% 和 0.21%。高等植物叶硫含量这种由污染源向外显著降低的规律与前人的研究结果一致<sup>[27, 28]</sup>。说明维管束植物樟树和马尾松叶组织硫含量能反映大气硫沉降量以及空间分布特征。



误差线上方不同字母表示樟树组间(大写字母表示)和松树组间(小写字母)平均值有显著差异;  $P < 0.05$

图 3 贵阳地区从市中心往外樟树叶和松树叶硫含量空间变化  
Fig. 3 Spatial variations of S content in *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* Lamb. leaves with the distance from the Guiyang center

作为西南的经济、文化、政治中心之一的贵阳市曾有过严重的酸雨污染历史,如今市区及周边许

多二氧化硫排放量大的企业也已经关闭或搬迁到偏远的乡镇,但生活二氧化硫排放量削减幅度低于工业源,因此,硫沉降水平仍然较高的具体原因是:一方面居民、服务行业由于餐饮、取暖等生活需要,大量燃烧矿物燃料排放烟气造成低空大气污染,而且民用炉灶和小型锅炉数量多、分布广、燃烧条件差、烟气就近排放,另一方面贵阳年均风速较小,而  $\text{SO}_2$  浓度与风速成反比,加之又地处黔中山地丘陵中部,对污染物的扩散不及时,最终造成区域性的严重  $\text{SO}_2$  污染。

## 2.3 樟树和松树叶氮、硫含量与大气氮沉降量和 $\text{SO}_2$ 浓度的关系

瞿丽雅等<sup>[29]</sup>曾应用苔藓袋技术对贵阳市区 13 个点的大气  $\text{SO}_2$  浓度进行过指示研究,发现  $\text{SO}_2$  浓度( $x$ )和苔藓硫含量( $y$ )显著正相关( $y = 0.0026x + 0.231$ ,  $P < 0.05$ )。用市区的苔藓样品硫含量估算的市区大气  $\text{SO}_2$  浓度为  $53.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  与 2009 年贵阳大气  $\text{SO}_2$  浓度( $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )相符<sup>[30]</sup>, 观山湖夏季  $\text{SO}_2$  浓度均值为  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[31]</sup> 与对应区域(12 ~ 24 km)估算的  $\text{SO}_2$  浓度值高度一致(表 2)。Xiao 等<sup>[16]</sup>归纳了不同地区不同藓氮含量( $y$ )和大气氮沉降( $x$ )的平均变化关系( $y = 0.052x + 0.7325$ ,  $P < 0.001$ ),根据该综合关系和对应地区石生藓的氮含量对本研究区域各采样点的大气氮沉降通量进行了计算(表 2),其结果与 Xiao 等<sup>[16]</sup>、刘学炎等<sup>[32]</sup>对贵阳地区的氮沉降量估算结果一致,表 3 中也归纳了已有报道的该研究区域大气氮沉降量和  $\text{SO}_2$  浓度数据,与估算结果一致。

将用苔藓氮、硫含量估算的大气氮沉降量以及大气  $\text{SO}_2$  浓度分别与樟树和松树叶氮、硫含量进行拟合发现,樟树和松树叶氮含量与大气氮沉降量均存在显著相关关系,樟树和松树叶硫含量与大气  $\text{SO}_2$  浓度同样也存在显著相关关系(图 4)。不同地区的植物根际土壤的总氮、硫浓度差异均无显著差异(表 1),所选择的樟树长势相同树龄相近,松树也同样是长势相同树龄相近,因此,植株从土壤中吸收的氮、硫在不同采样点之间没有明显的不同,叶片氮、硫含量的变化可以归因于氮沉降和大气  $\text{SO}_2$  浓度的变化,关晖等<sup>[35]</sup>的研究也表明了大气  $\text{SO}_2$  浓度的变化是导致不同区域针叶硫含量变化的主要原因之一。

此外,也有部分研究者利用不同种类的高等植物指示大气氮、硫沉降的变化<sup>[10, 22, 36]</sup>,但关于不同种类植物对大气氮、硫的吸收和吸附能力差异还不

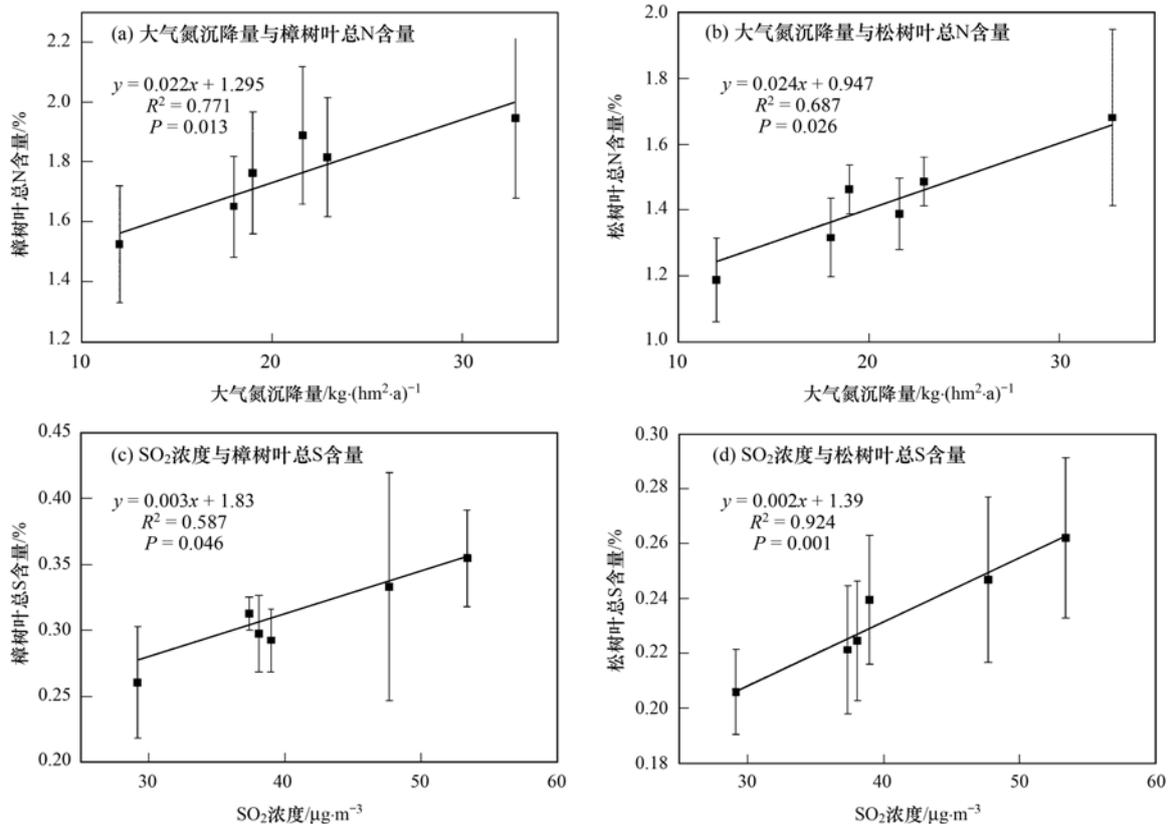
表 2 不同采样点大气氮沉降量和 SO<sub>2</sub> 浓度估算值Table 2 Estimation of atmospheric N deposition and SO<sub>2</sub> concentration in different sampling sites

距离 /km	样品数 (n)	石生苔藓氮含量 (DW)/%	大气氮沉降 /kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	石生苔藓硫含量 (DW)/%	大气 SO <sub>2</sub> 浓度 /μg·m <sup>-3</sup>
0~6	5	2.41 ± 0.16	32.22 ± 3.11	0.37 ± 0.02	53.40 ± 6.89
6~12	5	1.86 ± 0.15	21.63 ± 2.86	0.35 ± 0.02	47.54 ± 6.29
12~18	5	1.66 ± 0.03	17.84 ± 0.59	0.33 ± 0.01	39.01 ± 4.74
18~24	4	1.34 ± 0.12	11.68 ± 2.26	0.33 ± 0.02	38.07 ± 7.38
24~30	3	1.72 ± 0.04	19.01 ± 0.83	0.33 ± 0.02	37.69 ± 7.54
30~36	4	1.92 ± 0.24	22.90 ± 4.56	0.31 ± 0.03	29.23 ± 9.99

表 3 不同区域大气氮沉降量和 SO<sub>2</sub> 浓度变化Table 3 Variations of atmospheric N deposition and SO<sub>2</sub> concentration in different areas

距离 /km	文献报道大气氮沉降值 /kg·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	文献报道大气 SO <sub>2</sub> 浓度 /μg·m <sup>-3</sup>
0~6	30.18 <sup>[33]</sup> ; 29.21 ± 6.17 <sup>[32]</sup>	50~60 <sup>[34]</sup> ; 58 <sup>[30]</sup>
12~24	11.95 ± 3.95 <sup>[32]</sup>	40 <sup>[31]</sup>
24~36	14.31 ± 5.11 <sup>[32]</sup>	

是很清楚,相关的研究也非常少,本研究首次应用不同维管束植物叶氮、硫含量同时指示区域大气氮、硫沉降,为维管束植物叶组织氮、硫含量指示区域大气氮硫沉降提供了更加有利的理论支撑,具有推动高等植物叶片监测区域大气氮、硫沉降从定性向定量发展的意义,为进一步研究大气氮、硫沉降对西南喀斯特地区城市生态系统营养元素循环的影响提供理论指导。

图 4 叶总氮含量与大气氮沉降量以及叶总硫含量与大气 SO<sub>2</sub> 浓度的定量关系Fig. 4 Quantitative relation between atmospheric N deposition and leaves total N content and quantitative relation between SO<sub>2</sub> concentration and leaves total S content

### 3 结论

(1) 维管束植物樟树和马尾松叶总氮、硫含量

能够对大气氮、硫沉降同时作出响应,可以同时反映贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化:市区的大气氮沉降量最高,往外逐渐降低,最低值出现在离市

中心 18 ~ 24 km 距离范围内,再往外由于农业氮源的输入使得大气氮沉降有轻微回升;城市的生产生活给贵阳市区带来了最高的大气硫,往外逐渐降低,在有较少硫污染源的城郊和农村区域有着最低的大气硫。

(2)可以利用石生苔藓的氮、硫含量较为准确地估算该研究区域大气氮沉降量和 SO<sub>2</sub> 浓度,将估算结果分别与樟树、松树叶氮、硫含量进行拟合,发现樟树和松树叶氮含量与大气氮沉降量均存在显著相关关系,樟树和松树叶硫含量与大气 SO<sub>2</sub> 浓度也存在显著相关关系,而植物从土壤中吸收的氮、硫在不同采样点之间没有明显的不同,进一步说明维管束植物叶片大气生物监测方法有效的特点。

#### 参考文献:

- [ 1 ] He H, Wang Y S, Ma Q X, *et al.* Mineral dust and NO<sub>x</sub> promote the conversion of SO<sub>2</sub> to sulfate in heavy pollution days [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 4172, doi: 10.1038/srep04172.
- [ 2 ] Sheppard L J, Leith I D, Crossley A, *et al.* Stress responses of *Calluna vulgaris* to reduced and oxidised N applied under 'real world conditions' [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(3): 404-413.
- [ 3 ] Wellburn A, Higginson C, Robinson D, *et al.* Biochemical explanations of more than additive inhibitory effects of low atmospheric levels of sulphur dioxide plus nitrogen dioxide upon plants [J]. *New Phytologist*, 1981, **88**(2): 223-237.
- [ 4 ] Murray F, Wilson S, Qifu M. Effects of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> on growth and nitrogen concentrations in lucerne and barrel medic [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1994, **34**(3): 319-328.
- [ 5 ] Sousa R, Duque L, Duarte A J, *et al.* In vitro exposure of *Acer negundo* pollen to atmospheric levels of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>: effects on allergenicity and germination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(4): 2406-2412.
- [ 6 ] Xiao H Y, Xie Z Y, Tang C G, *et al.* Epilithic moss as a bio-monitor of atmospheric N deposition in South China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116** (D24): D24301, doi: 10.1029/2011JD016229.
- [ 7 ] Manninen S, Huttunen S. Response of needle sulphur and nitrogen concentrations of Scots pine versus Norway spruce to SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **107**(3): 421-436.
- [ 8 ] Murray F, Wilson S, Monk R. NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> mixtures stimulate barley grain production but depress clover growth [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1992, **32**(3): 185-192.
- [ 9 ] Phoenix G K, Emmett B A, Britton A J, *et al.* Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(4): 1197-1215.
- [ 10 ] Lau O W, Luk S F. Leaves of *Bauhinia blakeana* as indicators of atmospheric pollution in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(18): 3113-3120.
- [ 11 ] Dmichowski W, Bytnerowicz A. Monitoring environmental pollution in Poland by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles [J]. *Environmental Pollution*, 1995, **87**(1): 87-104.
- [ 12 ] Holopainen J K, Kainulainen E, Oksanen J, *et al.* Effect of exposure to fluoride, nitrogen compounds and SO<sub>2</sub> on the numbers of spruce shoot aphids on Norway spruce seedlings [J]. *Oecologia*, 1991, **86**(1): 51-56.
- [ 13 ] Gebauer G, Giesemann A, Schulze E D, *et al.* Isotope ratios and concentrations of sulfur and nitrogen in needles and soils of *Picea abies* stands as influenced by atmospheric deposition of sulfur and nitrogen compounds [J]. *Plant and Soil*, 1994, **164**(2): 267-281.
- [ 14 ] Dueck T A, Dorèl F G, Ter Horst R, *et al.* Effects of ammonia, ammonium sulphate and sulphur dioxide on the frost sensitivity of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, **54**(1): 35-49.
- [ 15 ] Schaberg P G, Perkins T D, McNulty S G. Effects of chronic low-level N additions on foliar elemental concentrations, morphology, and gas exchange of mature montane red spruce [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, **27**(10): 1622-1629.
- [ 16 ] Xiao H Y, Tang C G, Xiao H W, *et al.* Mosses indicating atmospheric nitrogen deposition and sources in the Yangtze River Drainage Basin, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**: D14301, doi: 10.1029/2009JD012900.
- [ 17 ] Xiao H Y, Wu L H, Zhu R G, *et al.* Nitrogen isotope variations in camphor (*Cinnamomum camphora*) leaves of different ages in upper and lower canopies as an indicator of atmospheric nitrogen sources [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 363-367.
- [ 18 ] Perry E, Hickman G W. A survey to determine the leaf nitrogen concentrations of 25 landscape tree species [J]. *Journal of Arboriculture*, 2001, **27**(3): 152-159.
- [ 19 ] Gundersen P, Emmett B A, Kjonaas O J, *et al.* Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 37-55.
- [ 20 ] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q, *et al.* Atmospheric transport of urban-derived NH<sub>3</sub>: Evidence from nitrogen concentration and δ<sup>15</sup>N in epilithic mosses at Guiyang, SW China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(5): 715-722.
- [ 21 ] Xiao H Y, Tang C G, Xiao H W, *et al.* Stable sulphur and nitrogen isotopes of the moss *Haplocladium microphyllum* at urban, rural and forested sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(34): 4312-4317.
- [ 22 ] Power S A, Collins C M. Use of *Calluna vulgaris* to detect signals of nitrogen deposition across an urban-rural gradient [J].

- Atmospheric Environment, 2010, **44**(14): 1772-1780.
- [23] Magill A H, Aber J D, Hendricks J J, *et al.* Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition[J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(2): 402-415.
- [24] Kuang Y W, Sun F F, Wen D Z, *et al.* Nitrogen deposition influences nitrogen isotope composition in soil and needles of *Pinus massoniana* forests along an urban-rural gradient in the Pearl River Delta of south China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(4): 589-595.
- [25] Kaiser W, Dittrich A, Heber U. Sulfate concentrations in Norway spruce needles in relation to atmospheric SO<sub>2</sub>: a comparison of trees from various forests in Germany with trees fumigated with SO<sub>2</sub> in growth chambers[J]. *Tree Physiology*, 1993, **12**(1): 1-13.
- [26] Zeng J R, Zhang G L, Bao L M, *et al.* Sulfur speciation and bioaccumulation in camphor tree leaves as atmospheric sulfur indicator analyzed by synchrotron radiation XRF and XANES [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(3): 605-612.
- [27] Sun F F, Wen D Z, Kuang Y W, *et al.* Concentrations of sulphur and heavy metals in needles and rooting soils of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) trees growing along an urban-rural gradient in Guangzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **154**(1-4): 263-274.
- [28] Ohmann L F, Grigal D F. Spatial and temporal patterns of sulfur and nitrogen in wood of trees across the north central United States[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, **20**(5): 508-513.
- [29] 瞿丽雅, 林齐维, 李梅, 等. 苔藓植物含硫量与大气 SO<sub>2</sub> 间对应关系的应用研究[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 1994, **12**(1): 45-48.
- [30] Xiao H W, Xiao H Y, Long A M, *et al.* Chemical composition and source apportionment of rainwater at Guiyang, SW China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2013, **70**(3): 269-281.
- [31] 叶辉, 李存雄, 张勇. 贵阳市二氧化硫浓度变化分析[J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 2015, **37**(2): 103-106.
- [32] 刘学炎, 肖化云, 刘丛强, 等. 基于石生藓类氮含量的贵阳地区大气氮沉降[J]. *生态学报*, 2009, **29**(12): 6646-6653.
- [33] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotopes of the moss *Haplodadium microphyllum* in an urban and a background area (SW China): the role of environmental conditions and atmospheric nitrogen deposition[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(21): 5413-5423.
- [34] 毛竹, 王浩. 1991-2010 年贵阳市二氧化硫变化趋势、影响因素和防控措施[J]. *环境科学导刊*, 2013, **32**(5): 71-74.
- [35] 关晖, 肖化云, 朱仁果, 等. 马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3777-3781.
- [36] Pitcairn C E R, Skiba U M, Sutton M A, *et al.* Defining the spatial impacts of poultry farm ammonia emissions on species composition of adjacent woodland groundflora using Ellenberg Nitrogen Index, nitrous oxide and nitric oxide emissions and foliar nitrogen as marker variables [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **119**(1): 9-21.

## CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Emissions from Stationary Sources .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer .....	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing .....	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan .....	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust .....	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus .....	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation .....	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters .....	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas .....	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan .....	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities .....	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir .....	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System .....	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi .....	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake .....	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure .....	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria .....	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River .....	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling .....	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite .....	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar .....	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater .....	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag .....	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite .....	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water .....	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes .....	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System .....	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition .....	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH) .....	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology .....	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency .....	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils .....	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation .....	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope .....	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu .....	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang .....	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou .....	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu <sup>2+</sup> -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter .....	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism .....	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model .....	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar .....	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i> .....	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition .....	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu .....	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange .....	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province .....	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行